

УДК 681.5.015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО КРИВОЙ РАЗГОНА МЕТОДОМ СИМОЮ

Стезьмащук Сергей Валерьевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации
промышленных установок электротехнического факультета
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета,
Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.
E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания систем с автоматической настройкой регуляторов для систем управления электроприводами с изменяющимся моментом инерции в широком диапазоне.

Цель работы: вывод методики определения момента инерции привода на основе обработки данных кривой разгона скорости привода методом Симою. Обязательным условием является реализация методики вычислительными средствами на базе контроллерных систем управления.

Методы исследования. Теоретические исследования основаны на методах классической теории автоматического управления и теории электропривода. Практические исследования подтверждены модельным экспериментом с применением программной среды MatLAB.

Результаты. Разработана методика, позволяющая вычислительными средствами в автоматическом режиме на основе данных кривой разгона привода определять момент инерции привода. Обосновано использование данной методики в самонастраивающихся системах с коррекцией параметров регуляторов привода. Проведены исследования условий реализации методики, и выявлено, что в качестве кривой разгона эффективнее использовать пусковую характеристику на холостом ходе привода. Выведено допустимое значение управляющего воздействия, при котором ток якоря не превышает максимального значения. Для подтверждения разработанной методики проведено имитационное моделирование элементами пакета SimPowerSystems в среде MatLAB. Показано, что рассмотренная методика предпочтительна для электроприводов постоянного тока с жёсткими связями в рабочем органе привода, что является ограничением в использовании метода Симою.

Выводы. Разработанная методика определения момента инерции электропривода на основе метода площадей Симою позволяет реализовать алгоритм идентификации момента инерции в автоматическом режиме. Это повысит уровень автоматизации технологических комплексов за счёт внедрения систем с автоматической настройкой, где реализован данный алгоритм идентификации.

Ключевые слова:

Станочный электропривод, определение момента инерции, метод Симою, автоматическая настройка регулятора.

Введение

Все классические методы определения момента инерции [1], такие как метод маятниковых колебаний раскачивания ротора, метод падающего груза и метод свободного выбега, являются методами стендовых испытаний и не могут быть реализованы в режиме нормальной эксплуатации работы привода. Для повышения уровня автоматизации работы технических систем требуется разработка самонастраивающихся систем управления электроприводами, работающими в режиме нормальной эксплуатации.

Важным вопросом самонастраивающихся систем управления является определение параметров электропривода, которые делятся на параметры электрического двигателя и параметры рабочего органа электропривода. Информация о параметрах двигателя доступна на шильдиках, которые в последнее время представляются в виде чипов (электронный шильдик), встроенных в корпус двигателя (например, интерфейс DRIVE-CLIQ фирмы Siemens), «что делает совершенным коммуникацию между моторами и системами приводов» [2]. Параметром, которым обладает рабочий орган и который зависит от ситуации использования, и поэтому может быть определён только в динамиче-

ском режиме, является суммарный момент инерции электропривода.

Вопросу параметрической идентификации объекта управления, где определяется момент инерции, посвящено много работ. Разработанные методы параметрической идентификации [3], как правило, реализуются в адаптивных системах с идентификатором [4], где в качестве модели используется передаточная функция, полученная на основе временной или частотной характеристики, определённой экспериментально. Одной из таких работ является статья [5], в которой «приведена методика определения момента инерции в замкнутом электроприводе с привлечением вещественного интерполяционного метода». В соответствии с данным методом, определение момента инерции осуществляется на основе обработки численными методами данных временной характеристики на выходе следящей системы. Рассматриваемая в данной статье методика может быть реализована в адаптивной системе с прямым управлением. Другим примером адаптивной системы с прямым управлением, но на основе определения частотной характеристики объекта управления, является автоматическое устройство для «идентификации многоходовых линейных объектов автоматизации в режиме нормальной эксплуатации» [6].

Большое значение имеют адаптивные системы с косвенным управлением, где точность идентификации объекта выше, чем в системах с прямым управлением. Здесь важную роль играют методы настройки регуляторов по кривой разгона объекта. От точности метода идентификации и сложности математического описания модели объекта управления зависит качество настройки регулятора. Недостатком адаптивных систем с косвенным управлением является сложность процедур настройки регулятора. В этом случае актуальным вопросом является повышение уровня автоматизации процедуры настройки. Проблемы автоматической настройки регулятора при косвенном управлении наиболее часто решаются формульными методами настройки, такими как метод Зиглера–Никольса или Чина–Хронеса–Ресвика и др., хорошо описанными как в отечественной [7, 8], так и в иностранной литературе [9–13]. Основной проблемой формульных методов является соотношение адекватности модели и применимости к методам синтеза по прямым показателям качества [14–17].

Из-за значительных изменений момента инерции механизма динамические характеристики привода будут сильно отличаться от настроечных характеристик, что приведёт к ухудшению качества производства и снижению производительности оборудования. В связи с этим актуальным являются способы автонстройки приводов после каждого изменения момента инерции механизма. Для реализации таких способов в статье исследуется вопрос применения метода Симою для идентификации суммарного момента инерции электропривода по кривой разгона скорости двигателя. Использование метода Симою позволит реализовать процедуру автоматической настройки регулятора в адаптивной системе с косвенным управлением.

Постановка задачи

Регулируемый электропривод на базе двигателя постоянного тока (ДПТ) с реверсивным тиристорным преобразователем, работающий на холостом ходе, можно представить как объект управления с передаточной функцией по сигналу управления U_y [18]:

$$W_{\text{OY}}(p) = \frac{\omega(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{\text{OY}}}{(T_{\text{II}}p + 1)(T_{\text{Э}}T_{\text{М}}p^2 + T_{\text{М}}p + 1)}, \quad (1)$$

где K_{OY} – коэффициент усиления объекта управления; T_{II} – постоянная времени преобразователя; $T_{\text{Э}}$, $T_{\text{М}}$ – электромагнитная и электромеханическая постоянные времени привода.

Параметр $T_{\text{М}}$ определяется суммарным моментом инерции J_{Σ} и жёсткостью механических характеристик привода β :

$$T_{\text{М}} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}. \quad (2)$$

Суммарный момент инерции J_{Σ} является неизвестным параметром из-за неопределённости момента инерции механизма. У большинства промыш-

ленных механизмов изменение момента инерции возникает после приложения нагрузки, при этом возникает статический момент на валу двигателя, что не соответствует передаточной функции привода (1).

Изменение момента инерции привода в режиме холостого хода возможно для ограниченного круга приводов. Примером являются станочные механизмы для метало- или деревообработки. Изменение момента инерции осуществляется в тех станочных механизмах, где крепится обрабатываемая деталь. Например, у токарного станка деталь крепится к механизму главного движения, а у фрезерного – на столе механизма подачи. Массогабаритные показатели обрабатываемой детали определяют момент инерции привода и влияют на динамические показатели качества привода станка. Статический момент на валу двигателя в таких приводах без нагрузки (вне режима резания) обуславливается только силами трения механизма, которые составляют не более 10 % от номинальной нагрузки.

Существенное изменение момента инерции привода может привести к неудовлетворению требований по динамическим перепадам скорости станочных механизмов. Особенно эта проблема актуальна для приводов с малым передаточным числом редуктора или для безредукторных приводов.

Рассмотрим задачу определения суммарного момента инерции привода J_{Σ} по экспериментально снятой кривой разгона скорости вращения двигателя $\omega(t)$ с использованием метода Симою. Выявим наиболее благоприятные условия проведения эксперимента для минимизации ошибки определения момента инерции и влияние на точность определения момента инерции под воздействием сил трения в механизме.

Метод площадей Симою

Для решения поставленной задачи используется метод площадей Симою [19], который позволяет по кривой разгона аналитически определить коэффициенты передаточной функции модели объекта:

$$W_{\text{M}}(p) = K_{\text{M}} \frac{1 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_m p^m}{1 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_n p^n} e^{-\tau p},$$

где K_{M} – коэффициент усиления модели; a_i , b_i – коэффициенты передаточной функции модели; τ – время запаздывания.

Представленная модель соответствует объекту с самовыравниванием, что характерно для систем регулирования скорости, рассматриваемых в работе. Для настройки следящей системы, где выходной координатой является угол поворота вала привода, методом Симою привод должен рассматриваться как объект без самовыравнивания, что требует некоторых преобразований кривой разгона. В любом случае определение коэффициентов a_i и b_i осуществляется по алгоритму:

1. На вход преобразователя привода задаётся скачкообразный сигнал управления $U_y(t)$ вели-

чиной $U_{у.зад}$. В результате экспериментально снимаются данные кривой разгона скорости вращения объекта $\omega(t)$. В общем случае кривая разгона может быть снята с ненулевых значений входной $U_y(0)$ и выходной $\omega(0)$ величин в малых отклонениях входного сигнала $\Delta U_y(t)$ с малым приращением $\Delta U_{у.зад}$ и выходного сигнала $\Delta \omega(t)$.

2. Определяется величина запаздывания τ , как время, за которое значение кривой $\omega(t)$ с момента приложения сигнала управления $U_y(t)$ не превышает 0,5–1 % от установившегося значения $\omega_{уст}$ кривой разгона $\omega(t)$.
3. Определяется коэффициент усиления модели объекта

$$K_M = \frac{\omega_{уст}}{U_{у.зад}}$$

4. Рассчитывается вспомогательная функция

$$\varphi(t) = \frac{\omega_{уст} - \omega(t + \tau)}{\omega_{уст}}$$

5. Составляется система из $N=m+n$ алгебраических уравнений

$$a_k = b_k + S_k + \sum_{j=1}^{k-1} b_j S_{k-j}, \quad (3)$$

где $k=1, \dots, N$; S – площади вспомогательной функции $\varphi(t)$

$$S_k = \mu_{k-1} + \sum_{j=0}^{k-2} \mu_j S_{k-1-j};$$

μ – моменты вспомогательной функции $\varphi(t)$

$$\mu_{k-1} = \frac{1}{(k-1)!} \int_0^{\infty} (-t)^{k-1} \varphi(t) dt.$$

Система алгебраических уравнений (3) решается относительно коэффициентов a_k и b_k . При этом $a_{n+1} = \dots = a_N = 0$ и $b_{m+1} = \dots = b_N = 0$.

Обработка данных

Учитывая общее описание привода (1), примем передаточную функцию модели в виде

$$W_M(p) = \frac{K_M}{1 + a_1 p + a_2 p^2} e^{-\tau p},$$

где

$$K_M = \frac{\omega_{уст}}{U_{у.зад}}; \quad \tau = T_{\Pi}; \quad a_1 = T_M; \quad a_2 = T_3 T_M.$$

Исходя из (2) суммарный момент инерции определится следующим образом

$$J_{\Sigma} = \beta T_M = \beta a_1. \quad (4)$$

Для определения суммарного момента инерции J_{Σ} необходимо определить жёсткость β и коэффициент a_1 , который, по выражению (3), вычисляется следующим образом

$$a_1 = S_1 = \mu_0 = \int_0^{\infty} \varphi(t) dt.$$

Вычисление запаздывания τ , вместо выполнения п. 2 алгоритма Симою, осуществляется приравнением постоянной времени преобразователя T_{Π} . Такая замена апериодического звена с постоянной времени T_{Π} на звено запаздывания $e^{-\tau p}$ приемлема, т. к. $T_{\Pi} \ll T_M$.

Для расчёта данных вспомогательной функции φ_i определяется момент времени t_i , следующий за значением времени запаздывания τ :

$$t_i = \min\{t_i \mid t_i \geq \tau\},$$

тогда

$$\varphi_j = \frac{\omega_n - \omega_{j+l}}{\omega_n - \omega_0}, \quad j = 0, \dots, n-l,$$

где $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_l, \dots, \omega_n$ – измеренные значения кривой разгона $\omega(t)$ в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_l, \dots, t_n$ соответственно.

Здесь установившееся значение определится как $\omega_{уст} = \omega_n - \omega_0$.

Для коэффициента a_1 интеграл функции $\varphi(t)$ вычислим методом трапеций

$$a_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n-l} (\varphi_j + \varphi_{j-1})(t_j - t_{j-1}). \quad (5)$$

Проведение эксперимента в среде MatLAB

Для проведения эксперимента по определению суммарного момента инерции в качестве примера выбран электропривод постоянного тока с тиристорным преобразователем со встречно-параллельной схемой и совместным управлением.

Принят абсолютно жёсткий механизм. На рис. 1 представлена имитационная модель привода, составленная с помощью элементов библиотеки SimPowerSystems среды MatLAB.

Результатом являются экспериментальные данные скорости ω_i и времени t_i , где $i=0, \dots, n$, разность между моментами времени в начале временного интервала должна быть меньше, чем время запаздывания τ . Конечное время эксперимента t_k должно быть достаточным, чтобы переходный процесс установился, так что примем $\omega_{уст} = \omega_n$.

Эксперимент проходит в два этапа (рис. 2):

1. Электропривод работает без нагрузки, со скоростью холостого хода ω_{01} , соответствующей заданному сигналу управления U_{y1} . В момент времени t_1 осуществляется приращение по сигналу управления ΔU_y до значения $U_{y2} = U_{y1} + \Delta U_y$. В результате получаем кривую разгона до скорости холостого хода ω_{02} . По данным кривой разгона в соответствии с методом Симою вычисляется коэффициент модели a_1 по формуле обработки данных (5).
2. При холостом ходе ω_{02} в момент времени t_2 на механизм оказывается возмущающее воздействие статическим моментом на вал двигателя M_c . В результате скорость двигателя изменяется до значения ω_{c3} , которое измеряется в момент t_3 . Оценивается статический момент нагрузки и изменение скорости вала двигателя

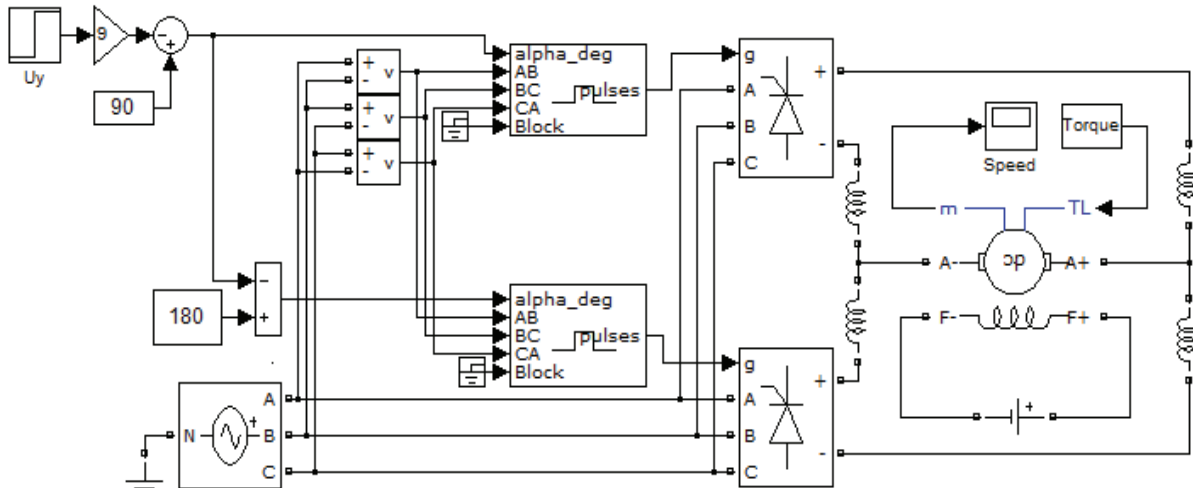


Рис. 1. Имитационная модель привода постоянного тока в среде MatLAB

Fig. 1. Simulation model of the dc drive in MatLAB

$\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{c3}$. Рассчитывается жёсткость механической характеристики электропривода $\beta = \frac{M_c}{\Delta\omega}$ и суммарный момент инерции J_Σ по формуле (4).

Статический момент измерим косвенным способом: измеряя напряжение якоря $U_\text{я}$ и скорость якоря при холостом ходе, а также статический ток якоря при нагрузке, измеряемый в момент времени t_3 :

$$I_{\text{яс}} = I_\text{я}(t_3).$$

Статический момент определим исходя из соотношения

$$M_c = C\Phi I_{\text{яс}}. \quad (6)$$

Постоянную двигателя СФ можно определить из соотношения

$$U_\text{я} = C\Phi\omega_0, \quad (7)$$

где значения $U_\text{я}$ и ω_0 измеряются в моменты времени t_1 или t_2 .

Значение статического тока $I_{\text{яс}}$ измеряется в конечный момент времени t_3 (рис. 2). Выразим из

(7) постоянную СФ и подставим в (6). Приращение по скорости после статической нагрузки на валу двигателя $\Delta\omega = \omega_{02} - \omega_{c3}$. В результате жёсткость механической характеристики привода постоянного тока определим по формуле

$$\beta = \frac{M_c}{\Delta\omega} = \frac{U_\text{я}(t_2)I_{\text{яс}}}{\omega_{02}(\omega_{02} - \omega_{c3})}. \quad (8)$$

Обработка данных эксперимента и расчёт суммарного момента инерции по (4) осуществляется после совершения эксперимента аналитическими вычислениями (5) и (8), не требующими человеческого вмешательства. Это позволяет создавать системы с непрямым адаптивным управлением, где осуществляется автонастройка параметров регуляторов на основе эксперимента.

Данный алгоритм реализуется программно и может быть использован в контроллере привода, что соответствует принципам автонастройки систем автоматического регулирования.

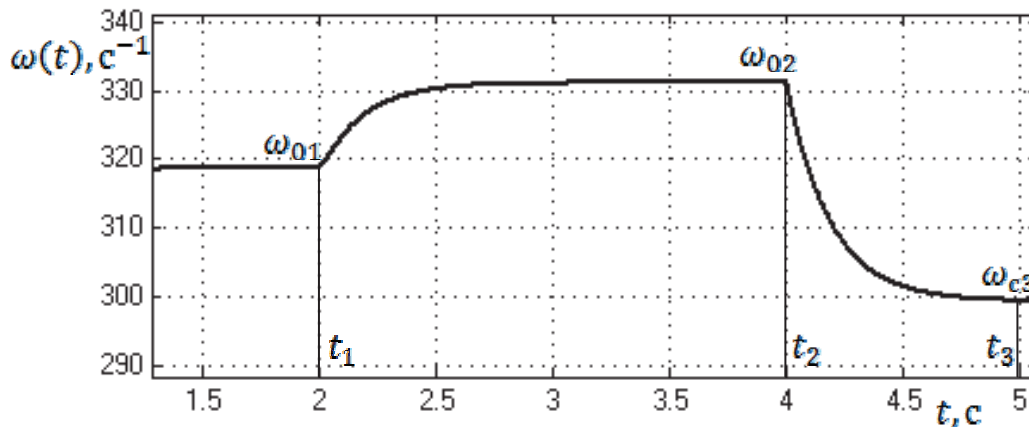


Рис. 2. Этапы эксперимента в методике определения момента инерции

Fig. 2. The stages of the experiment in the technique for determining inertia moment

Исследование точности определения суммарного момента инерции привода

Целью исследования является определение условий эксперимента, при которых обеспечивается высокая точность определения суммарного момента инерции. Для этого осуществляется вычисление относительной ошибки суммарного момента инерции привода при различных:

- характерах переходных процессов скорости привода;
- значениях ΔU_y и начальных значениях U_{y1} сигнала управления;
- значениях суммарного момента инерции J_Σ .

Для расчёта суммарного момента инерции нет необходимости определять коэффициент a_2 . Это упрощает модель привода до аperiodического звена первого порядка со звеном запаздывания. Следовательно, возникает вопрос исследования о влиянии на ошибку определения суммарного момента инерции при различных соотношениях электромеханической постоянной времени и электромагнитной постоянной времени привода.

Для исследования выбраны два двигателя с различными характерами переходных процессов скорости: 2ПБ160L с аperiodическим и 2ПФ200L с колебательным переходным процессом. Расчётные параметры привода с каждым из двигателей при заданном суммарном моменте инерции $J_\Sigma = 1,2 J_{дв}$ приведены в табл. 1.

Для проверки идентичности имитационной модели с линеаризованной моделью (1) произведено моделирование переходных процессов скорости привода, полученных при малом приращении сигнала управления (рис. 3).

Проверка метода Симоу на линеаризованной модели (1) показала нулевую ошибку определения суммарного момента инерции. В имитационной модели (рис. 1) работа реверсивного тиристорного преобразователя с совместным управлением осуществляется адекватнее, чем работа аperiodического звена первого порядка. В результате интерес

представляет исследование точности определения J_Σ при различных значениях больших и малых воздействий.

Таблица 1. Расчётные параметры исследуемых приводов с двигателями

Table 1. Design parameters of the experimental drives with engines

| Параметр Parameter | 2ПБ160L | 2ПФ200L |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Момент инерции двигателя $J_{дв}$, кг·м ² $J_{дв}$ engine inertia moment, kg·m ² | 0,1 | 0,3 |
| Электромеханическая постоянная времени T_M , с Electromechanical time constant T_M , s | 0,12 | 0,0314 |
| Электромагнитная постоянная времени T_Σ , с Electromagnetic time constant T_Σ , s | 0,0123 | 0,0147 |
| Коэффициент демпфирования переходных процессов Transient damping factor | 1,56 | 0,73 |
| Характер переходных процессов Transient behavior | Аperiodический Aperiodic | Колебательный Oscillatory |

Проведём исследование значения относительной ошибки суммарного момента инерции ΔJ_Σ при изменении сигнала управления U_{y1} и его приращении ΔU_y , а также при изменении значений J_Σ . Определение относительной ошибки суммарного момента инерции осуществляется по формуле

$$\Delta J_\Sigma = \frac{J_\Sigma^m - J_\Sigma}{J_\Sigma^m} \cdot 100 \%,$$

где J_Σ^m – заданный в имитационной модели суммарный момент инерции; J_Σ – вычисленное методом Симоу значение суммарного момента инерции по экспериментальным данным.

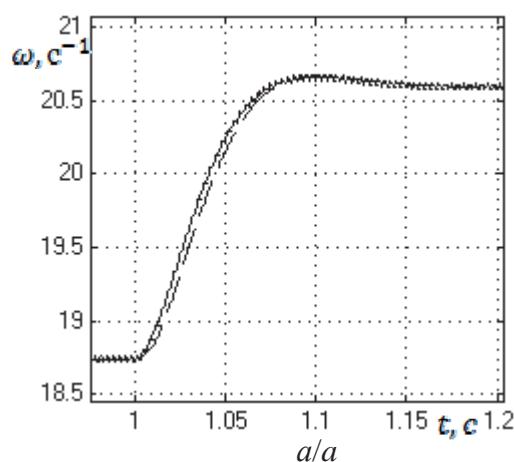


Рис. 3. Переходные процессы скорости имитационной (—) и линеаризованной (---) моделей привода с двигателями 2ПФ200L (а) и 2ПБ160L (б)

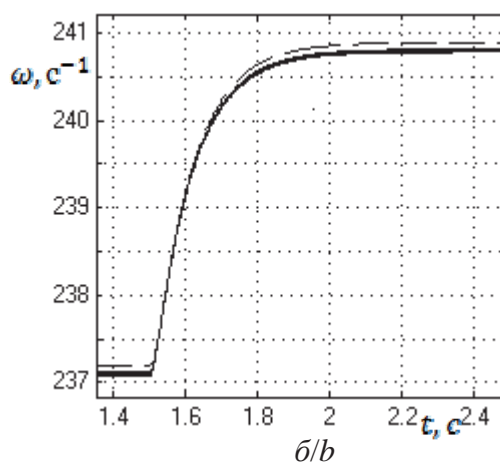


Fig. 3. Transients of simulation (—) and linearized (---) model speed with the engines 2ПФ200L (a) and 2ПБ160L (b)

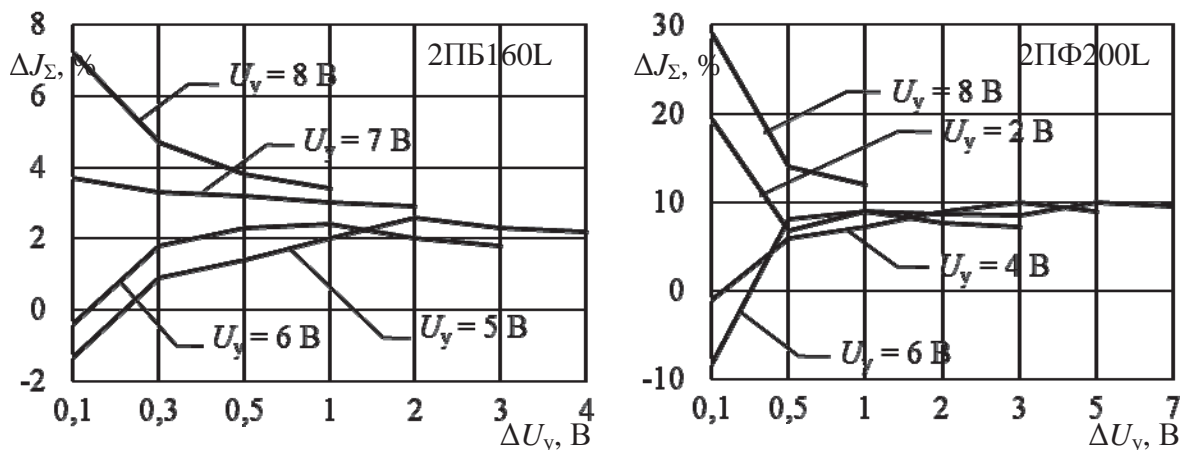


Рис. 4. Ошибка определения момента инерции ΔJ_Σ при варьировании U_y и ΔU_y

Fig. 4. Error in determining the inertia moment ΔJ_Σ at variation of U_y and ΔU_y

На рис. 4 представлены результаты вычисления ΔJ_Σ в значениях U_{y1} и ΔU_y и постоянном значении суммарного момента инерции $J_\Sigma = 1,2 J_{ДВ}$ и максимальном значении сигнала управления $U_{y,max} = 10$ В для двух приводов с рассматриваемыми двигателями.

Исследуя диаграммы результатов на рис. 4 можно сделать следующие наблюдения:

1. При малых ΔU_y ошибка ΔJ_Σ является нестабильной и варьируется в значительных пределах, в зависимости от значения U_y .
2. При больших ΔU_y ошибка ΔJ_Σ стремится к постоянной величине и мало зависит от значения U_y .
3. Точность вычисления J_Σ зависит от качества переходных процессов: для привода с низким демпфированием ошибка ΔJ_Σ выше.

По результатам наблюдения можно сделать следующие выводы:

1. Соотношение постоянных времени привода T_θ и T_M влияет на ошибку ΔJ_Σ . При увеличении влияния механической составляющей привода относительно её электромагнитной составляющей ошибка ΔJ_Σ уменьшается. Это ограничивает применение метода Симою для приводов с малым коэффициентом демпфирования переходных процессов. К таким относятся привода с упругими связями. Для решения этой проблемы необходимо использовать передаточную функцию модели более высокого порядка, тогда возникает вопрос о точности определения коэффициентов передаточной функции модели для членов полиномов высокого порядка.
2. Наиболее приемлемая стабильность определения ΔJ_Σ выполняется при больших ΔU_y . Тогда в качестве кривой разгона нужно рассматривать пусковую характеристику привода при максимально возможном U_y .

На рис. 5 представлена диаграмма результатов вычисления ΔJ_Σ на основе обработки данных эксперимента при $U_y = 0$ В и $\Delta U_y = 0,9 U_{y,max}$ с учётом максимального угла открывания тиристоров $\alpha_{max} = 165^\circ$. Из диаграммы видно, что с возрастани-

ем значения J_Σ ошибка ΔJ_Σ уменьшается, что подтверждает первый вывод.

Ограничением для U_y является получение пусковой характеристики привода, при которой значение тока якоря I_a не достигает максимального значения $I_{я,max}$

$$I_{я,max} > I_a = \frac{U_d}{R_{яц}},$$

где U_d – выпрямленное напряжение на выходе тиристорного преобразователя; $R_{яц}$ – активное сопротивление якорной цепи.

Для рассматриваемого привода постоянного тока с системой импульсно-фазового управления тиристорным преобразователем вертикального типа [20] $U_d = U_{d0} \cos \alpha$, где угол открывания тиристоров

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{U_y}{U_{y,max}} \right).$$

допустимое значение для максимального тока якоря $I_{я,max}$

$$\begin{aligned} \alpha_{доп} &= \arccos \frac{U_{d,доп}}{U_{d0}} = \arccos \frac{I_{я,max} R_{яц}}{U_{d0}} = \\ &= \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{U_{y,доп}}{U_{y,max}} \right). \end{aligned}$$

Из равенства двух последних членов получим допустимое значение сигнала управления для рассматриваемого привода

$$U_{y,доп} = U_{y,max} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{I_{я,max} R_{яц}}{U_{d0}} \right). \quad (9)$$

Максимальное значение тока якоря $I_{я,max}$ является паспортными данными двигателя. Значения U_{d0} и $R_{яц}$, как указывалось выше, необходимо определять тестированием. Жёсткость механической характеристики привода β необходимо определять по значениям постоянной ДПТ СФ и $R_{яц}$ [18]. Параметр СФ можно определить по паспортным данным двигателя, например

$$\cos\Phi = \frac{P_H}{\omega_H I_{яH}}, \quad (10)$$

где P_H , ω_H , $I_{яH}$ – номинальные значения мощности, скорости и тока якоря двигателя.

Расчёт β по данным на основе тестирования электрической цепи якоря избавляет от нежелательного второго этапа эксперимента, где необходимо прикладывать нагрузку на вал двигателя.

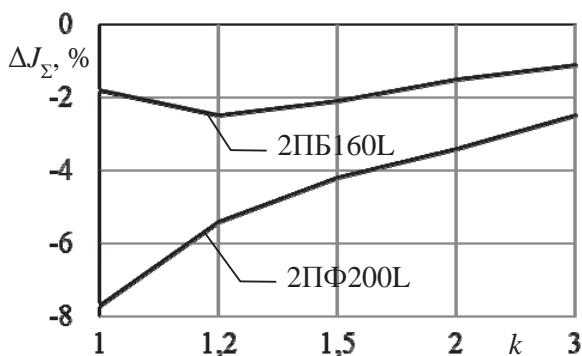


Рис. 5. Ошибка определения момента инерции ΔJ_Σ по данным пусковой характеристики привода при различной кратности момента инерции $J_\Sigma = kJ_{дв}$

Fig. 5. The error in determining the inertia moment ΔJ_Σ by the data of the drive starting characteristic at different ratio of the inertia moment $J_\Sigma = kJ_{дв}$

На рис. 6 приведена модель рассматриваемого привода, где имитируется тестирование параметров U_{d0} и $R_{яц}$ в соответствии с методами измерения параметров обмоток электрических машин [21], которая может проводиться в автоматическом режиме:

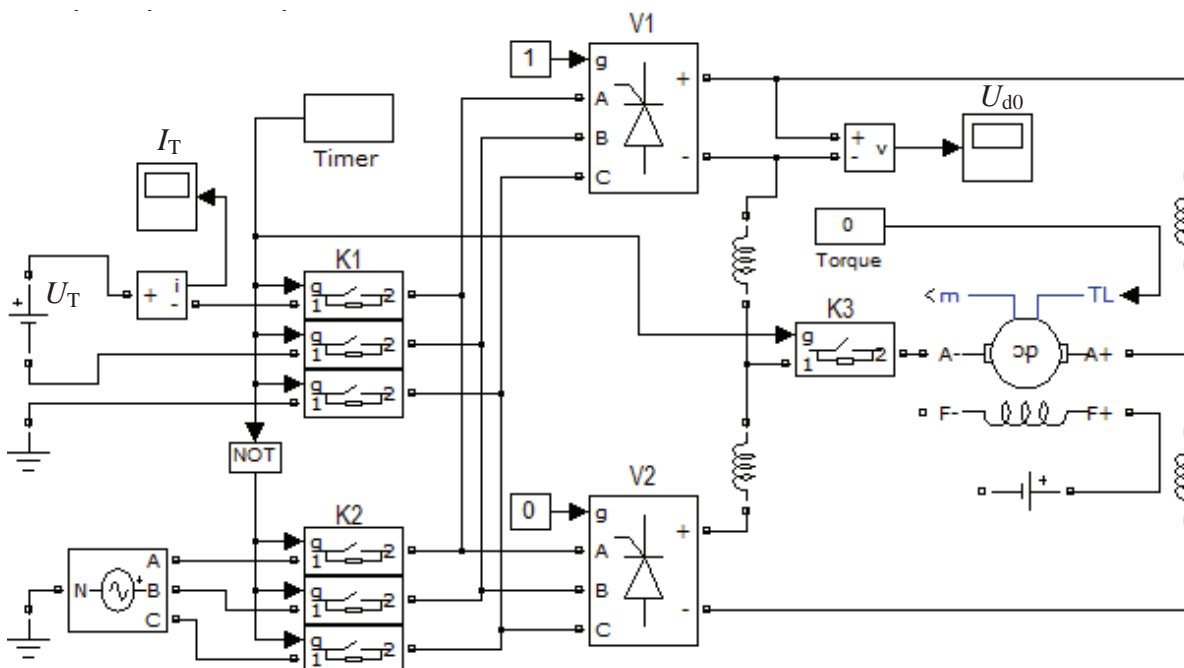


Рис. 6. Имитация тестирования привода постоянного тока в среде MatLAB

Fig. 6. Simulation of dc drive test in MatLAB

1. Отключается обмотка возбуждения. Прямая группа вентилях V1 полностью открыта, а обратная V2 полностью закрыта.
2. Включается временная программа Timer, которая сначала замыкает переключатели K1 и K3. В результате к якорной цепи через фазу А и В сети для тестирования подводится постоянное низковольтное напряжение U_T . Измеряется ток в якорной цепи I_T и вычисляется активное сопротивление

$$R_{яц} = \frac{U_T}{I_T}. \quad (11)$$

3. Затем программа Timer размыкает K1 и K3 и замыкает K2. В результате якорь двигателя отключается от преобразователя и на вход преобразователя подаётся напряжение сети. Вольтметром на выходе преобразователя измеряется напряжение U_{d0} .
4. По формуле (9) вычисляется значение сигнала управления для получения пусковой характеристики привода.

Методика идентификации суммарного момента инерции привода

Алгоритм определения J_Σ для адаптивных систем с косвенным управлением:

1. Привод отключается от всех обратных связей.
2. Проводится тестирование электрической цепи привода. В результате определяются значения $R_{яц}$ и U_{d0} . В соответствии с паспортными данными двигателя по формулам (10) и (9) вычисляются параметры $\cos\Phi$ и $U_{y,доп}$. Зная $\cos\Phi$ и $R_{яц}$ вычисляется жёсткость β .

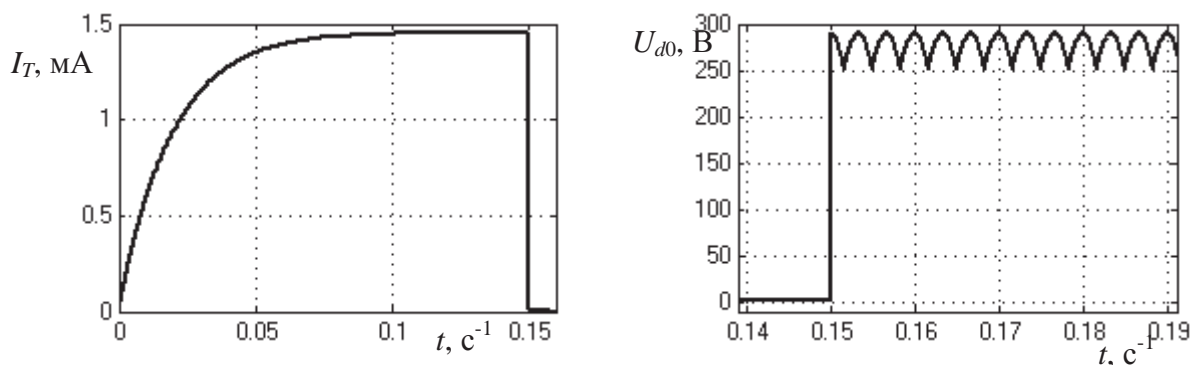


Рис. 7. Ток в цепи якоря I_T и выпрямленное напряжение U_{d0} при холостом ходе на выходе преобразователя

Fig. 7. Current in the circuit of I_T armature and rectified voltage U_{d0} in no-load running at the converter output

3. Осуществляется разгон привода на холостом ходе при сигнале управления со значением $U_{y,доп}$. В результате получается пусковая характеристика скорости привода, которая обрабатывается методом Симою, и по формулам (5) и (4) вычисляется значение J_{Σ} .

Пример определения момента инерции привода

Рассмотрим применение методики на примере электропривода постоянного тока с двигателем 2ПБ160L и суммарным моментом инерции $J_{\Sigma}=1,2J_{дв}=0,12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. На рис. 7 представлены результаты тестирования электрической цепи привода. При измерении ток в цепи при тестирующем напряжении $U_T=1 \text{ мВ}$ составил $I_T=1,456 \text{ мА}$.

Практически, мультиметр покажет измеренное значение активного сопротивления по формуле (11)

$$R_{яц}^* = \frac{1}{1,456} = 0,687 \text{ Ом.}$$

Затем при измерении выпрямленного напряжения при холостом ходе на выходе преобразователя мультиметр по среднеквадратичному значению покажет $U_{d0}^*=277 \text{ В}$.

На основе паспортных данных двигателя 2ПБ160L:

- номинальная мощность $P_H=7500 \text{ Вт}$;
- номинальная скорость вращения якоря $\omega_H=234,6 \text{ с}^{-1}$;
- номинальный ток якоря $I_{яH}=38,7 \text{ А}$,

вычисляется постоянная двигателя по формуле (10)

$$C\Phi = \frac{7500}{234,6 \cdot 38,7} = 0,825,$$

и жёсткость β по формуле [21]

$$\beta = \frac{C\Phi^2}{R_{яц}} = \frac{0,825^2}{0,687} = 0,991.$$

По формуле (9) вычисляется допустимое значение сигнала управления $U_{y,доп}=2,51 \text{ В}$, при котором осуществляется эксперимент, где получаем кривую разгона скорости привода (рис. 8, а). На рис. 8, б видно, что ток якоря не достигает максимального значения для двигателя 2ПБ160L $I_{я,макс}=4I_{яH}=154,8 \text{ А}$.

В результате обработки данных кривой скорости по формуле (5) вычисляется коэффициент $a_1=0,1218$, и по формуле (4) вычисляется значение суммарного момента инерции $J_{\Sigma}=0,1283 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Ошибка определения J_{Σ} составляет около 1,5 %.

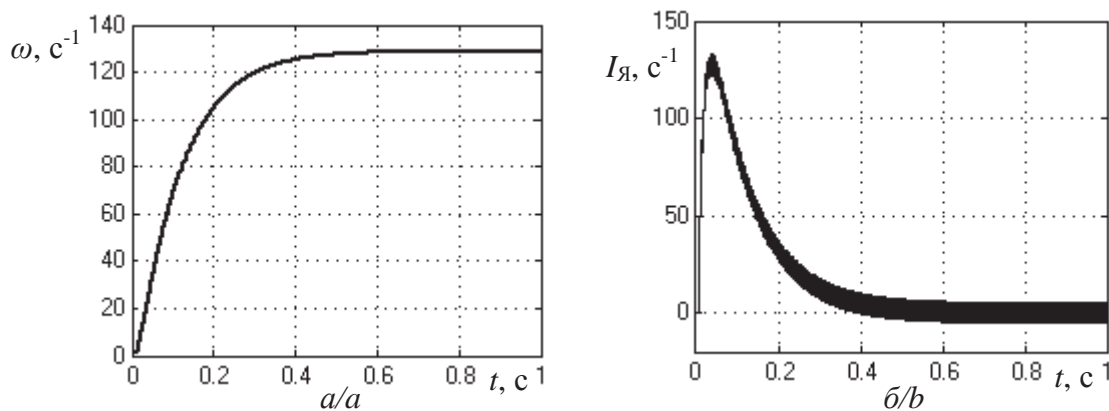


Рис. 8. Переходные процессы скорости (а) и тока якоря (б) привода с двигателем 2ПБ160L при значении сигнала управления преобразователем $U_y=2,51 \text{ В}$

Fig. 8. Transients of the velocity (a) and the armature current (b) of the drive with the engine 2ПБ160L at the converter control signal value $U_y=2,51 \text{ В}$

Влияние моментов трения на точность определения момента инерции

Самые большие силы трения для станочных приводов, удерживающих обрабатываемую деталь, характерны для приводов подач фрезерных станков, где перемещается стол с деталью. Момент трения привода стола с деталью, но без обработки, составляет не более 10 % от номинального момента двигателя. Результаты исследования точности вычисления момента инерции привода при статическом реактивном моменте на валу двигателя $M_c=0,1M_H$ представлены на рис. 9.

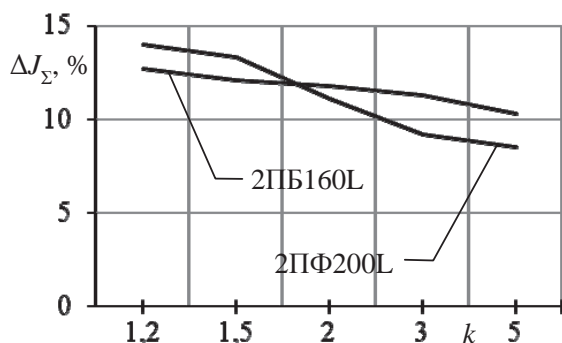


Рис. 9. Ошибка определения момента инерции ΔJ_Σ при различной кратности момента инерции $J_\Sigma = kJ_{дв}$ и реактивном статическом моменте $M_c = 0,1M_H$

Fig. 9. Error in determining the inertia moment ΔJ_Σ at different ratio of the inertia moment $J_\Sigma = kJ_{дв}$ and reactive static moment $M_c = 0,1M_H$

Ошибка определения $J_{тс}$ для привода стола фрезерного станка, когда используется редукторный привод $J_\Sigma = (1,2-1,5)J_{дв}$, составляет не более 15 %.

При $J_\Sigma \geq 5J_{дв}$, что характерно для безредукторных приводов, ошибка составляет менее 10 %.

Для токарных приводов главного движения, где удерживается обрабатываемая деталь, моменты сил трения на порядок ниже, чем у привода стола фрезерных станков. Поэтому ошибка определения J_Σ для привода главного движения токарного станка не будет превышать 2 % как для редукторного, так и для безредукторного привода.

Выводы

Приведена методика определения суммарного момента инерции привода в разомкнутом электроприводе с использованием метода Симою. Методика осуществляется вычислительными процедурами обработки массива данных, полученных по кривой разгона привода. Это позволяет проводить идентификацию момента инерции в автоматических системах настройки регуляторов электроприводов. Оценка момента инерции осуществляется с достаточно приемлемой точностью для приводов с жёсткими связями.

Рассмотрен пример применения методики для привода постоянного тока с тиристорным преобразователем, где ошибка определения момента инерции составила 1,5 %. Рассмотренная методика позволяет строить системы с автоматической настройкой регуляторов, где реализован алгоритм идентификации момента инерции рассмотренной методикой, что позволяет повысить уровень автоматизации технологических комплексов.

Недостатком данной методики является ограниченная область приводов, в которых момент инерции не связан с моментом нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борцов Ю.А., Суворов Г.В., Шестаков Ю.С. Экспериментальное определение параметров и частотных характеристик автоматизированных электроприводов. – Л.: Энергия, 1969. – 104 с.
- GATCHINA prom-automation Ltd. Серводвигатели Siemens. URL: <http://www.g-p-a.ru/electroprivod/servomotor/24-servodvigateli-siemens.html> (дата обращения: 20.07.2014).
- Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
- Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. – М.: Изд-во «Спутник +», 2013. – 122 с.
- Алексеев А.С., Замятин С.В., Плотников Д.А. Определение момента инерции электропривода по временным характеристикам // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 65–69.
- Устройство для определения частотных характеристик функционирующих объектов; пат. 2285282 Рос. Федерация, МПК G05B 23/02; заявл. 04.01.2003; 10.10.2006, Бюл. № 28. – 1 с.
- Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86–99.
- Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирования // Компоненты и технологии. – 2003. – № 5. – С. 59–62.
- Aström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control // Journal of Process Control. – 2004. – V. 14. – Iss. 6. – P. 635–650.
- Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. Robust on-line relay automatic tuning of PID control systems // ISA Transactions. – 2000. – V. 39. – Iss. 2. – P. 219–232.
- Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. – V. 26. – P. 15–19.
- PID auto-tuning using new model reduction method and explicit PID tuning rule for a fractional order plus time delay model / Y.J. Cheon, H.R. Kyung, W.S. Su, L. Jietae, L. In-Beum // Journal of Process Control. – 2014. – V. 24. – Iss. 1. – P. 113–128.
- Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. – 2003. – V. 13. – Iss. 4. – P. 291–309.
- Степьмащук С.В. Оценка качества системы автоматического регулирования на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2010. – № 1. – С. 36–39.
- Степьмащук С.В. Об аналитическом синтезе по прямым показателям качества на основе упрощённой модели // Учёные записки КнАГТУ. – 2011. – № 4. – С. 12–17.
- Степьмащук С.В., Чернов А.Ю. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование // Электро-

- технические системы и комплексы: Междунар. сборник научных трудов. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – С. 256–265.
17. Стельмашук С.В. Настройка ПИД-регулятора по кривой разгона объекта с самовыравниванием для максимального быстродействия с заданным перерегулированием при идентификации объекта моделью первого порядка с запаздыванием // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 2. – С. 81–90.
 18. Автоматизированный электропривод промышленных установок / под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
 19. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 6. – С. 514–527.
 20. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.
 21. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / под ред. М.Г. Зименкова, Г.В. Розенберга, Е.М. Феськова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.

Поступила 21.10.2014 г.

UDC 681.5.015

IDENTIFICATION OF ELECTRIC DRIVE INERTIA MOMENT ON THE REACTION CURVE BY SIMOYU METHOD

Segey V. Stelmashchuk,

Komsomolsk-na-Amure State Technical University, 27, Lenin Avenue, Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russia. E-mail: rukdpsv@rambler.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop the systems with controller auto-tuning for electric drive control systems with variable inertia in a wide range.

The main aim of the study is to derive the technique for identifying a drive inertia moment based on data processing of the drive speed reaction curve by Simoyu method. The obligatory condition is the implementation of the techniques by the compute aids based on the control systems.

The methods used in the study. The theoretical research was based on the methods of classic control theory and the theory of the electric drive. Practical researches are confirmed by simulation in software environment of MatLAB.

The results. The author has developed the technique, which allows determining the inertia moment of the drive using the computer aids in the automatic mode based on the data of drive reaction curve. The application of this technique in the adaptive systems with auto-tuning controller was justified. The author studied the implementation of conditions of the technique and determined that it is more efficient to use the starting characteristic in no-load drive as the reaction curve. The allowable value of the control signal, in which the armature current does not exceed a maximum value, was computed. To prove this technique the author carried out simulation in SimPowerSystems package of MatLAB. It is shown that the above technique is preferable for electric drives with rigid connections in mechanic of the drive, which is a limitation when using the Simoyu method.

Conclusions. The developed technique for defining the inertia moment of the electric drive, based on the Simoyu areas method, allows implementing the identification algorithm of inertia moment in the automatic mode. This will increase the level of technological systems automation by introducing the systems with automatic tuning, which implement the identification algorithm.

Key words:

Machine electric drive, identification of the inertia moment, Simoyu technique, auto-tuning of controller.

REFERENCES

1. Bortsov Yu.A. Suvorov G.V., Shestakov Yu.S. *Ekspperimentalnoe opredelenie parametrov i chastotnykh kharakteristik avtomatizirovannykh elektroprivodov* [Experimental determination of the parameters and frequency characteristics of automated electric]. Leningrad, Energiya Publ., 1969. 104 p.
2. GATCHINA prom-automation Ltd. *Servodvigateli Siemens*. Available at: <http://www.g-p-a.ru/electroprivod/servomotor/24-servodvigateli-siemens.html> (accessed 20 July 2014).
3. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernye, nelineynye, optimalnye i adaptivnye sistemy* [Automatic Control Theory. Vol. 2. Multi-dimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004. 464 p.
4. Denisov V.A. *Sistemy pozitsionnogo elektroprivoda s peremennoy strukturoy upravleniya* [Systems of positional electric drive with variable structure control]. Moscow, Sputnik + Publ., 2013. 122 p.
5. Alekseev A.S., Zamyatin S.V., Plotnikov D.A. *Opreделение momenta inertsii elektroprivoda po vremennym kharakteristikam* [Determination of electric drive inertia moment by time characteristics]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no 5, pp. 65–69.
6. Goryachev V.F., Gudim A.S. *Ustroystvo dlya opredeleniya chastotnykh kharakteristik funktsioniruyushchikh obektov* [Device for determining frequency characteristics of operating objects]. Patent RF, no. 2285282, 2006.
7. Denisenko V.V. *PID-regulyatory: voprosy realizatsii. Ch. 2 [PID controllers: implementation issues. P. 2]. Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*, 2008, no. 1, pp. 86–99.
8. Mazurov V.M. *Avtomaticheskije regulyatory v sistemakh upravleniya i ikh nastroyka. Ch. 2. Avtomaticheskije regulyatory i ikh nastroyka. Obshchie svedeniya o promyshlennykh sistemakh regulirovaniya* [Automatic regulators in control systems and their settings. P. 2. Automatic control and adjustment. General informa-

- tion on the industrial control systems]. *Komponenty i tekhnologii*, 2003, no. 5, pp. 59–62.
9. Aström K.J., Hägglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 2004, vol. 14, Iss. 6, pp. 635–650.
 10. Tan K.K., Lee T.H., Jiang X. Robust on-line relay automatic tuning of PID control systems. *ISA Transactions*, 2000, vol. 39, Iss. 2, pp. 219–232.
 11. Oviedo J.J.E., Boelen T., Van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, vol. 26, pp. 15–19.
 12. Cheon Y.J., Kyung H.R., Su W.S., Jietae L., In-Beum L. PID auto-tuning using new model reduction method and explicit PID tuning rule for a fractional order plus time delay model. *Journal of Process Control*, 2014, vol. 24, Iss. 1, pp. 113–128.
 13. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 2003, vol. 13, Iss. 4, pp. 291–309.
 14. Stelmashchuk S.V. Otsenka kachestva sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya na osnove uproshchennoy modeli [Estimation of quality of the automatic control system based on the simplified model]. *Uchionye zapiski KnAGTU*, 2010, no. 1, pp. 36–39.
 15. Stelmashchuk S. V. Ob analiticheskom sinteze po pryamym pokazatelyam kachestva na osnove uproshchennoy modeli [An analytical synthesis on direct indicators of quality based on the simplified model]. *Uchionye zapiski KnAGTU*, 2011, no. 4, pp. 12–17.
 16. Stelmashchuk S.V., Chernov A.Yu. Sintez PID-regulyatora sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s maksimalnym bystrodeystviem i ogranicheniem na pereregulirovanie [Synthesis of PID automatic control system with maximum speed and restriction on overshoot]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Intern. collection of scientific papers*. Magnitogorsk, MGTU im. G.I. Nosova Publ., 2012. pp. 256–265.
 17. Stelmashchuk S.V. Nastroyka PID-regulyatora po krivoy razgona obekta s samovyvornivaniem dlya maksimalnogo bystrodeystviya s zadannym pereregulirovaniem pri identifikatsii obekta modelu pervogo poryadka s zapazdyvaniem [Setting the PID by the ramp object with self-leveling for speed with the predetermined overshoot in object identification by the first order model with delay]. *Vestnik TOGU*, 2013, no. 2, pp. 81–90.
 18. Onishchenko G.B. *Avtomatizirovanny elektropriwod promyshlennykh ustanovok* [Automation electric drive of industrial plants]. Moscow, RASHN Publ., 2001. 520 p.
 19. Simoyu M.P. Opredelenie koeffitsientov peredatochnykh funktsiy linearizovannykh zvenev sistem regulirovaniya [Definition of the transfer functions coefficients of the linearized links of control systems]. *Avtomatika i telemekhanika*, 1957, no. 6, pp. 514–527.
 20. Krupovich V.I., Barybin Yu.G., Samover M.L. *Spravochnik po proektirovaniyu avtomatizirovannogo elektroprivoda i sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Handbook on designing automated electric drive and process control systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 416 p.
 21. Zimenkov M.G., Rozenberg G.V., Feskov E.M. *Spravochnik po nadelke elektrooborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy* [Handbook on adjustment of electrical equipment at enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 480 p.

Received: 21 October 2014.